

# 基于 ECDIS 的航线自动规划算法设计

杜志啸<sup>1</sup>, 齐晓锐<sup>2</sup>, 郭鹏<sup>1</sup>

(1. 中船航海科技有限责任公司 北京 100070; 2. 北京瑞致泰华科技有限公司 北京 100083)

**摘 要:** 针对目前航海任务中主要依赖航海人员手动拟定计划航线的问题, 提出基于 ECDIS 的航线自动规划算法, 提取电子海图数据并划定碍航区, 利用 Delaunay 三角网构建海洋环境模型, 以改进的 A 星搜索算法自动规划出一条最优航线。对比商业 ECDIS 平台经验航线组合航路, 实验结果表明, 该算法自动规划的航线航程更短, 航路点更少, 在复杂的大面积海域中, 可搜索到一条经济安全的航线。

**关键词:** ECDIS; 航线规划; 碍航物要素; Delaunay 三角网; A 星算法

中图分类号: U675.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-7953(2019)01-0163-05

长期以来, 航线规划设计是根据任务需求, 在纸质或电子海图上, 人工判读海图内容, 评估海图要素, 手工拟定计划航线<sup>[1]</sup>。该方法不但存在航线设计耗时长、设计结果严重依赖个人经验、自动化程度低等问题。而且海上环境复杂多变, 设计航线时容易出错, 尤其是在不存在历史航线海域或缺少航行经验的海域, 航线设计难度很大<sup>[2]</sup>。

目前市场部分电子海图系统已经初具航线辅助设计能力<sup>[3]</sup>, 可在手动规划航线后进行航线评估, 对航线及附近进行危险物检测并给出报警<sup>[4-5]</sup>, 但未有航线自动规划及决策功能。针对这一问题, 提出基于 ECDIS 的航线自动规划方法。利用计算机取代传统的手工航线规划, 以期降低航海作业人员的工作强度, 提高航线设计的效率和质量, 增强航行的安全性和经济性。

## 1 航线自动规划算法流程

提出的航线自动规划方法是指在航线规划的工作中, 航海人员只需设定出发港和目的港, 该方法便可自动规划出一条安全可行的航路。其规划过程主要分两步: 一是进行海洋环境建模, 即分析处理电子海图中与航行安全相关的各项数据<sup>[6]</sup>, 并建立航路规划所需的统一数据要素; 二是基于海洋环境模型, 考虑船舶特性情况下进行最优寻路, 寻找到一条航程最短路线。计算流程见图 1。

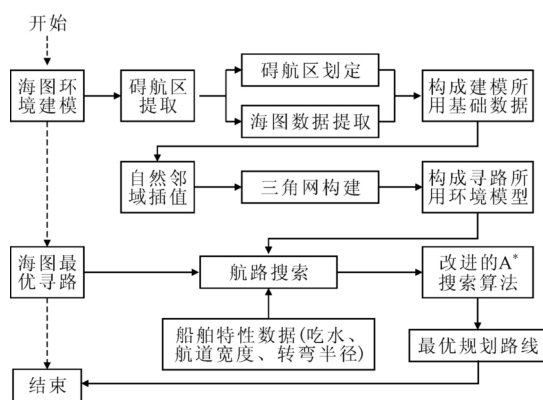


图1 自动航线规划流程

## 2 海洋环境模型搭建

### 2.1 碍航区提取

#### 2.1.1 碍航区划定

在提取碍航区数据前, 需要划定电子海图中需提取的海图数量和碍航物类别。

对于海图数量, 认为在起始点和目标点经纬度下大圆连接线所经过的所有不同比例尺海图均为需提取的海图。对于碍航物类别, 使用 IHO S-52<sup>[7]</sup> 约定的强制碍航区和可选碍航区。其中强制碍航区主要包括深度范围、疏浚区、浮船坞、报废船、陆地区、浮码头、未测区、岸线结构物等; 可选碍航区主要包括通航分隔带、近岸交通区、受限区域、警告区、海上作业区、军事演习区、海上飞机起降区、潜水艇航道、锚泊区、海水养殖场等, 需要用户根据实际船舶及航行任务状态事先选定。

在电子海图中碍航区主要分为面、点两种。依照 S-52 中约定的物标范围划定碍航区, 可以最大程度的保证航行安全。

收稿日期: 2018-09-03

修回日期: 2018-10-23

第一作者: 杜志啸(1988—) 男, 硕士, 工程师

研究方向: 船舶导航、舰桥产品的设计和研发

### 2.1.2 电子海图数据提取

碍航区数据提取。提取航线可能跨越多个海图的所有碍航区,并将其处理为具有经纬度坐标、碍航属性的点状值。对于面碍航区的处理,给出周界轮廓的经纬度坐标,并将每点都标识为特定属性的点碍航物;对于点碍航区,给出周界多边形缓冲区的经纬度坐标。

水深数据提取。为进一步保证航行安全,除碍航区、缓冲区等船舶不可航行区域,还需提取海图上的所有水深数据。水深数据分为两类。第一类为位于碍航区内的水深数据,该类数据不提取。第二类为大洋中散布的水深点,该类数据需要全部提取,由于海图测绘、制作等过程,可能会出现部分水深点数据不满足船舶吃水的要求,在航线规划时需要作为浅水碍航区处理。

### 2.1.3 碍航区合并

当碍航区、浅水碍航区、点碍航区存在相交或相互包含时,对碍航区进行合并处理。基于安全性考虑,碍航区边界给出一个缓冲半径为  $d$  的缓冲空间。此外,船舶在实际航行中,由于风浪的影响,总会偏离预定航线一段距离,两侧的偏离距离称为航道宽度,这里设置航道宽度为缓冲半径的 2 倍。缓冲半径根据特定船舶的实际特性确定,如船型、满载重量、舵的性能等,一般设定为 2 km。采用闵可夫斯基和以及多边形偏移<sup>[8-9]</sup>获得合并后的碍航区。

设 2 个凸多边形分别为  $P$ 、 $Q$ , 则闵可夫斯基和定义为

$$P \oplus Q = \{p + q \mid p \in P, q \in Q\} \quad (1)$$

对于碍航区,可能存在非凸多边形情况。当  $P$ 、 $Q$  不是凸多边形,则可以分解为多个子凸多边形集合的形式,表示成

$$P = \bigcup_{i=1}^k P_i \quad (2)$$

$$Q = \bigcup_{j=1}^l Q_j \quad (3)$$

则每对子凸多边形的闵可夫斯基和为,那么对于非凸多边形  $P$ 、 $Q$ , 其闵可夫斯基和如下。

$$P \oplus Q = \bigcup_{ij} S_{ij} \quad (4)$$

对多边形  $P$  与半径为  $r$ , 圆心在  $P$  外边界上的圆盘  $Br$  计算闵可夫斯基和  $P \oplus Br$ , 则半径  $r$  即为多边形  $P$  的偏移。

采用闵可夫斯基和对相交的碍航区进行合并,并以缓冲半径  $d$  的偏移进行外扩,则最终得到一个合理安全的碍航区。

## 2.2 海洋环境建模

由于水深点、碍航区等的的数据是一系列分布不规则、散乱的数据点,故采用三角剖分的方式线性拟合海洋地质环境,标识海洋环境的主要特征。

### 2.2.1 自然邻域插值

多数海图所提供的海洋地质环境数据较为稀疏,不能满足航道宽度、缓冲区等航路规划要求,故采用自然邻域插值法将三角网加密<sup>[10]</sup>。自然邻域插值方法自身带有局部地质特征自适应特性,满足任意范围和地域的网格加密。该方法根据插入点最近的节点集进行插值,离插值点越近的节点所占权重越大。根据 Delaunay 三角网的特性,插值时,在三角网中新增、删除、移动某个节点只会影响临近的三角形,对其他各点构成的三角形无影响,不会改变原有海图中水深、碍航区等的固有特性。

### 2.2.2 三角网构建

使用 Delaunay 三角网法,将所有提取的海洋地质环境坐标点以及插值得到的水深点进行三角剖分,以最近的三点形成三角形,限制各三角形的边皆不能相交,最后构成一个唯一的三角网<sup>[11-12]</sup>。用三角网模型取代规则的栅格模型,对于海洋这种复杂大面积环境,有效的减少了寻路的节点数,从而能够降低寻路算法的时间复杂度。

## 3 航线自动规划算法

Delaunay 三角网构建海洋环境模型后,采用改进的  $A^*$  算法进行寻路,自动建立一条满足航行评价标准的最优航线。最优航线包括航程最短、时间最少、安全最高等,这里仅考虑航程最短航线,如果要研究其他最优航线,只需变换算法中的某些参数即可。

### 3.1 算法介绍

$A^*$  算法<sup>[13]</sup> 基本思想是设定合适的启发函数,评估每个节点到目标点的代价,沿着代价小的点继续扩展直到找到目标点。 $A^*$  算法也存在着一些不足:在大规模寻路节点多的环境下, $A^*$  算法搜索速率大大降低;寻到的最终路径不够光滑,转折点较多。考虑到在海洋环境中,海洋环境辽阔,复杂多变,而船舶在行进时,过多的转向次数会增加船舶操作上的不便。针对海洋环境、船舶航行特点,在三角网格中进行  $A^*$  算法寻路,在寻路的同时对搜索到的路径进行平滑处理,以减少

船舶转弯次数、船舶航行节点数。

### 3.2 改进的 $A^*$ 算法

改进的  $A^*$  算法评估函数如下。

$$F(n) = G(n) + H(n) + \lambda n_a \quad (5)$$

式中:  $H(n)$  为启发式函数, 为节点  $n$  到目标点的代价, 这里采用欧式距离公式;  $G(n)$  不再是起始点到第  $n$  个节点的距离和, 而是每次寻路后同时对路径进行平滑处理, 为起始点到第  $n$  个节点的实际最短距离; 评估函数最后加入一个惩罚项  $n_a$ ,  $n_a$  为寻路时转向点个数, 惩罚因子  $\lambda$ , 当转向节点个数增多时, 加大对评估函数的惩罚力度, 惩罚因子  $\lambda$  的值由实验设定, 本文取  $\lambda = 25$ 。

三角网路径平滑处理算法。

步骤 1。初始化  $i = 1$ , 起始航路点  $S$ , 三角网个数为  $len$ 。

步骤 2。 $S$  与第  $i + 1$  个三角网共同边的 2 个节点构成一个扫描扇面  $\alpha$ 。

步骤 3。设第  $i + 1$  个三角网的第 3 个节点为  $P$ , 判断  $P$  点是否在扇面  $\alpha$  内。

1) 如果  $P$  在  $\alpha$  内, 则移动扫描扇面的一侧到  $P$  点与第  $i + 2$  个三角网构成新的扫描扇面, 令  $i = i + 1$ , 重复第 3 步。

2) 如果  $P$  不在  $\alpha$  内, 则将距离  $P$  点近的节点设为  $S$  并标记, 令  $i = i + 1$ , 返回到第 2 步。

步骤 4。当  $i = len$  时处理结束, 将标记过  $S$  的节点顺序连线即为平滑后的路径。

### 3.3 航线自动搜索算法

1) 将起始点所在的三角网放在 openlist 中。

2) 重复以下步骤。

①在 openlist 中查找  $F$  值最小的三角网, 作为当前三角网。

②把当前三角网移到 closelist 中。

③对当前三角网相邻的三角网进行以下步骤。

如果该相邻三角网已经在 closelist 中, 则继续检查下一个相邻三角网。

如果不在 openlist 中, 则添加到表里, 调用三角网路径平滑处理算法, 计算该三角网的  $G$  值, 保存  $G$  值和  $H$  值, 将该三角网的父节点设为当前三角网。

如果在 openlist 中, 则判断经由当前三角网到达该相邻三角网的  $G$  值是否小于原来保存的  $G$  值, 若小于, 则设置三角网的父节点为当前三角

网, 并重新设置该三角网的  $G$  值和  $H$  值。

④循环结束条件。当目标三角网被加入到 openlist 或者作为待检验节点时, 表示路径被找到, 循环结束。

3) 从目标点开始沿父节点遍历, 遍历所得的节点就是最后得到的最优路径。

## 4 算法验证与分析

为了验证航线自动生成算法的有效性, 进行仿真并给出仿真实验结果。实验基于真实的海洋数据, 开发环境为 Visual Studio 2010, 运行于 PC 机, windows 系统下。基于德国 SevenCs 公司开发的 EC2007 ECDIS Kernel 进行二次开发, 其中该 ECDIS 系统自带航线辅助功能, 可根据经验航路交通网组合出一条新的航线。

实验 1 的仿真结果见图 2, 完成起始点位置坐标 (16.155 26, 113.440 2) 到目标点位置坐标 (-1.691 93, 98.420 02) 的航线规划, 该区域由海南省出发, 目的地为明打威群岛, 途径南海、爪哇海, 海洋环境复杂, 障碍物较多且分布集中。

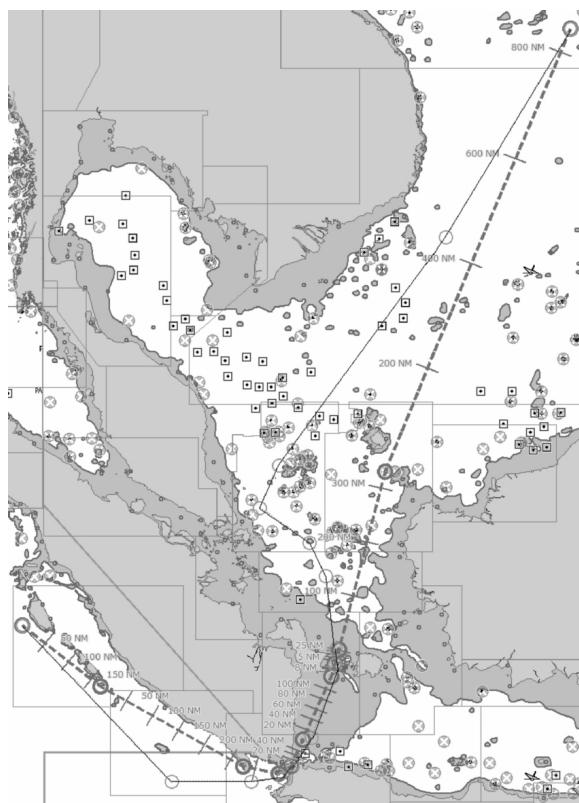


图 2 实验 1 仿真结果

海图中, 圆圈叉形图标为独立碍航点, 方形点状图标为海上平台。粗的虚线表示本文的算法自

动规划的一条航线, 细的实线表示 EC2007 ECDIS 中根据历史经验航路组合的航线。航路点的坐标表示为纬度、经度, 其中负号表示南纬或者西经。

表 1 为经典航线各航路点坐标, 表 2 为规划航线各航路点坐标。

表 1 实验 1 经典航线航路点坐标

航路点	纬度/(°)	经度/(°)
起始 S	16.155 260	113.440 2
1	10.011 900	110.011 7
2	3.154 100	105.443 2
3	1.866 697	104.916 9
4	0.824 633	106.279 5
5	-0.202 230	106.730 4
6	-2.409 670	106.994 1
7	-2.874 530	106.970 7
8	-3.157 400	107.026 6
9	-5.074 280	106.339 4
10	-5.394 580	106.120 6
11	-5.896 900	105.807 9
12	-6.308 670	105.553 6
13	-6.412 430	104.690 8
14	-6.416 150	102.498 3
目标 E	-1.691 930	98.420 02
总航程: 2 106.174 546 n mile		

表 2 实验 1 规划航线航路点坐标

航路点	纬度/(°)	经度/(°)
起始 S	16.155 260	113.440 2
1	2.960 887	108.352 0
2	-2.421 810	107.100 2
3	-2.862 010	106.987 0
4	-3.075 600	106.945 10
5	-3.238 320	106.878 60
6	-5.150 580	106.097 80
7	-5.931 240	105.786
8	-6.181 630	105.452 70
9	-5.951 790	104.466 50
10	-3.535 550	100.563 10
目标 E	-1.691 930	98.420 02
总航程: 1 927.344 574 n mile		

图 3 为实验 2 仿真结果, 起始点位置坐标 (41.518 09, 143.118 7) 到目标点位置坐标 (28.023 28, -115.995) 的航线规划, 该区域为由日本出发, 目的地为墨西哥西北部, 途径菲律宾海、太平洋的大洋航线。该航线航程较长, 海洋环境简单, 障碍物稀少。



图 3 实验 2 仿真结果

表 3 为经典航线各航路点坐标, 表 4 为规划航线各航路点坐标。

表 3 实验 2 经典航线航路点坐标

航路点	纬度/(°)	经度/(°)
起始 S	41.518 09	143.118 7
1	44.998 57	150.011 1
2	49.544 85	172.999 4
3	49.512 47	-169.948 0
4	34.492 04	-121.206 0
目标 E	28.023 28	-115.995 0
总航程: 4 787.734 798 n mile		

表 4 实验 2 规划航线航路点坐标

航路点	纬度/(°)	经度/(°)
起始 S	41.518 09	143.118 7
目标 E	28.023 28	-115.995 0
总航程: 4 767.558 362 n mile		

表 5 为在 2 种不同的海洋环境下, 本算法规划的航线与 EC2007 ECDIS 中根据经验航路交通网组合的航线的比较。

表 5 规划航路与经典航路比较

	航路	航路点 总个数	总航程/ n mile	航程减少 百分比/%
实验 1	规划	12	1 927.344 574	9.278 568
	经典	16	2 106.174 546	
实验 2	规划	2	4 767.558 362	0.423 203
	经典	6	4 787.734 798	

通过表 5 可以看出, 在航路点个数上, 本文提出的算法搜索的航路点更少, 尤其是在障碍物少, 海洋环境简单的情况下; 在总航程上, 本文搜索到的航路要比经典航路总航程短, 尤其是在海洋环境复杂, 不存在历史航线, 或者航行经验不足的情况下, 本文提出的航线规划算法可自动规划出一条安全经济航线。

## 5 结论

1) 航线自动规划算法能够在复杂缺少航行

经验海域规划出一条安全经济航线,在航海中具有一定的实用性;并且只需对评估函数的参数进行变换,便可得到其他评价标准的最优航线,具有一定的灵活性。

2) Delaunay 三角网模拟海洋环境,准确的构建海洋环境模型是航路自动规划算法的基础。

3) 本方法用不规则三角网模拟静态海洋环境,对动态的海洋环境如潮汐、风、海流的影响适应性需进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 宋景国. 基于 ECDIS 的舰船路径规划技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [2] 汤青慧. 基于电子海图的最佳航线优化算法[J]. 中国航海, 2010, 33(4): 6-9.
- [3] 任松涛, 陈雪峰. ECDIS 的功能与应用[J]. 广州航海学院学报, 2005, 13(1): 15-17.
- [4] 刘军坡, 曹玉堦, 赵学俊. 基于 ECDIS 的航线检验[J]. 世界海运, 2015(1): 20-23.
- [5] 曹玉堦, 胡江强, 刘军坡. 利用 ECDIS 预防船舶搁浅[J]. 航海技术, 2012(6): 39-42.
- [6] 蔡新梅. 电子海图信息系统(ECDIS)在船舶航行中的应用[J]. 船电技术, 2012, 32(6): 32-34.
- [7] 张玉洁, 房宏图, 王玉玲. 基于 S-52 标准电子海图的符号研究[J]. 海洋测绘, 2009, 29(6): 34-36.
- [8] VARADHAN G, MANOCHA D. Accurate minkowski sum approximation of polyhedral models[J]. Graphical Models, 2006, 68(4): 343-355.
- [9] ELBER G, KIM M S. Offsets, sweeps and Minkowski sums[J]. Computer-aided design, 1999, 31(3): 163-163.
- [10] 谭衢霖, 徐潇, 王浩宇, 等. 不同地貌类型区 DEM 空间内插算法精度评价[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(1): 139-149.
- [11] 胡金星, 潘懋, 马照亭, 等. 高效构建 Delaunay 三角网数字地形模型算法研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39(5): 736-741.
- [12] 武晓波, 王世新. Delaunay 三角网的生成算法研究[J]. 测绘学报, 1999, 28(1): 28-35.
- [13] 王德春, 陈利敏, 张孝芳. 基于 A\* 算法的舰船最佳航线选择[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2005, 18(4): 10-13.

## Design on Automatic Route Planning Algorithm Based on ECDIS

DU Zhi-xiao<sup>1</sup>, QI Xiao-rui<sup>2</sup>, GUO Kun<sup>1</sup>

(1. CSSC Marine Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. Beijing Ruizhitaihua Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the current navigation tasks mainly relying on the mariners to manually draw planned routes, an ECDIS-based automatic route planning algorithm was proposed. Extracting the electronic chart data and demarcating the obstacles, the Delaunay triangulation was used to establish a chart environment model. An optimal route was automatically planned by the improved A-star algorithm. Compared with the routes which composition of experience routes on the commercial ECDIS platform, the experimental results showed that the algorithm plans a shorter route and fewer waypoints, so it can search for an economical and safe route in a complex large area of sea.

**Key words:** ECDIS; route planning; obstacles; Delaunay triangulation; A-star algorithm

(上接第 162 页)

## Design of Ship Automatic Identification System for Enclosed Waters Based on LoRa

XIAO Chang-shi<sup>a, c, d</sup>, CHEN Qian-qian<sup>a</sup>, WEN Yuan-qiao<sup>b, c, d</sup>, ZHOU Chun-hui<sup>a, c, d</sup>, ZHANG Fan<sup>a, c, d</sup>

(a. School of Navigation; b. ITS Research Center; c. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology;

d. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** A new type of ship automatic identification system was designed and implemented based on wide-area internet of things for the characteristics and regulatory requirements of ships in enclosed waters. The data transmission protocol based on communication channel transmission capability, the data management method based on the navigation density of ships in enclosed waters and the ship speed, the gateway layout method based on LoRaWAN network protocol, and the data uplink and downlink mechanism based on system scale and gateway transmission capacity were designed. Simulation and experiments showed that the system is easy to deploy and reliable in data transmission. It can meet the needs of automatic identification of ships in enclosed waters, and can be widely used in ship-assisted navigation and safety supervision in enclosed waters.

**Key words:** wide area internet of things; automatic vessel identification; network capacity; data management; LoRa wide-area network